УДК 656
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-4-32-38

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ И РАСЧЕТЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМНЫХ УЧАСТКАХ ДОРОЖНОЙ ИНФРА СТРУКТУРЫ РОСТОВА-НА-ДОНУ

Дуров Р. С.*[1]*, Варнакова Е. В.*[1]*,
Кобзев К. О.*[1]*, Кобзева Н. Д*[2]*.
[1]Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2]Ростовский государственный медицинский университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
roma.0107@mail.ru
katya-arena97@mail.ru
5976765@mail.ru
5976765@mail.ru

В статье рассмотрены проблемные с точки зрения автомобильного трафика участки площади Комбайностроителей в Ростов-на-Дону и возможные мероприятия, которые могли бы улучшить ситуацию на этой развязке. Рассчитаны экологические показатели после проведения предложенных мероприятий по снижению выбросов СО автомобилями. Выполнен сравнительный анализ показателей до и после мероприятий. Полученные данные позволили установить, на сколько предложенные меры по оптимизации дорожного движения помогут снизить выбросы СО автомобилями.

Ключевые слова: автомобильный трафик, оптимизация дорожного движения, экологическая безопасность, массовый расход СО.

UDC 656
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2019-4-32-38

MEASURES TO OPTIMIZE ROAD TRAFFIC AND CALCULATIONS OF ENVIRONMENTAL SAFETY AT SOME PROBLEM SECTIONS OF ROAD-ON-DON ROAD INFRASTRUCTURE

Durov R. S.*[1]*, Varnakova E. V.*[1]*,
***Kobzev K. O*[1]*., Kobzeva N. D*[2]
[1]Don state technical university, Rostov-on-don, Russian Federation
[2]Rostov State Medical University, Rostov-on-don, Russian Federation
roma.0107@mail.ru
katya-arena97@mail.ru
5976765@mail.ru
5976765@mail.ru

The article discusses the problem areas of the Combine Builders Square in Rostov-on-Don and possible measures that could improve traffic at this roundabout. Environmental indicators were calculated after carrying out the proposed measures to reduce CO emissions by cars. A comparative analysis of indicators before and after the events. The data obtained made it possible to establish how much the proposed measures to optimize traffic will help to reduce CO emissions by cars.

Keywords: car traffic, optimization of traffic, environmental safety, mass consumption of CO.

Введение. Изучение трафика на площади Комбайностроителей вблизи ДК «Ростсельмаш» в Ростове-на-Дону показало, что автотранспортный поток на этой развязке можно оптимизировать.

На указанной территории особенно проблемными выглядят три участка:

— пешеходный переход перед светофором на проспекте Сельмаш, перед въездом на кольцо (площадь Комбайностроителей);

— пешеходный переход на улице Селиванова, расположенный после съезда с площади Комбайностроителей;

— участок от съезда с площади Комбайностроителей до улицы Вильнюсской (по 1-й Конной Армии) [1].

Основная часть

Мероприятия по оптимизации автомобильного трафика на проблемных участках. Установка светофора перед въездом на кольцо представляется нерациональной. Светофор замедляет движение и создает заторы на дорогах. Необходимо убрать светофор и перенести пешеходный переход на 50 м вглубь (в сторону пригородного автовокзала) [2]. Перед переходом следует установить предупреждающий знак 5.19.1 «Пешеходный переход». Перед самим кольцом дополнительные знаки не нужны, так как там уже есть знаки: 2.4 «Уступите дорогу» и 4.3 «Круговое движение» [3].

Также стоит перенести пешеходный переход на улице Селиванова на 50 м вглубь, дальше от кольца. При въезде на Селиванова с площади Комбайностроителей водители упираются в знак 5.19.1 «Пешеходный переход», который разделен с кольцом менее чем на 5 метров. Из-за этого транспортные средства (ТС) останавливаются, чтобы пропустить пешеходов, и образуют пробку. При плотном движении в час пик, чтобы пропустить хотя бы одного пешехода, останавливаются минимум 3–4 машины, которые блокируют две полосы на кольце площади Комбайностроителей. Если перенести пешеходный переход вглубь, то ситуация изменится в лучшую сторону, к тому же будут соблюдены все ГОСТы и нормативы [4].

Движение по улице 1-й Конной Армии — одностороннее, двухполосное. Полосы шире обычных, поэтому здесь возможен безаварийный проезд сразу трех ТС. Однако с обеих сторон дороги припарковано большое количество машин, и это значительно снижает пропускную способность магистрали [5].

Пробка может начинаться в этом месте, а заканчиваться лишь после пересечения улицы Веры Пановой. Чтобы улучшить ситуацию, следует запретить парковку от площади Комбайностроителей до улицы Вильнюсской (т. к. после нее начинается парковка, относящаяся к рынку). Этот участок нужно обеспечить знаками: 5.27 «Зона с ограничением стоянки»; 5.28 «Конец зоны с ограничением стоянки» и 8.5.4 «Время действия» (7:00–19:00). Это позволит значительно разгрузить дорожное полотно и увеличить пропускную способность участка дороги [6].

Расчеты экологической безопасности. Благодаря мероприятиям по оптимизации дорожного движения скорость транспортного потока увеличилась с 10 км/ч (2,78 м/с) до 20 км/ч (5,56 м/с).

Чтобы определить экологический эффект от мероприятий, проведенных на исследуемом участке, сравним выбросы монооксида углерода (CO) легковых автотранспортных средств (АТС) с бензиновыми (с принудительным зажиганием) и дизельными двигателями. Расчет ведется с использованием методических указаний [7].

Массовый расход, г/с, *i*-го загрязняющего вещества (ЗВ) единичным автотранспортным средством (АТС) определяется по формуле:

$$M_i = Q_{\text{ог}} c_i,$$

где $Q_{\text{ог}}$ — объемный расход отработавших газов (ОГ) двигателя единичного автомобиля, м^3/с; c_i — концентрация *i*-го вредного вещества в ОГ единичного автомобиля, г/м^3.

Рассчитаем объемный расход ОГ по формуле:

$$Q_{\text{ог}} = 0{,}0007\text{v}^2 - 0{,}0256\text{v} + 0{,}3184,$$

где v — средняя скорость АТС, м/с.

Для легковых автомобилей v определяется по формуле:

$$\text{v} = 1{,}8665\text{v}_{\text{тп}},$$

где $\text{v}_{\text{тп}}$ — скорость транспортного потока, м/с.

Рассчитаем скорости легковых АТС до и после оптимизации движения на перекрестке [8]. До оптимизации:

$$v = 1{,}8665 \cdot 2{,}78 = 5{,}19 \text{ м/с};$$

после оптимизации:

$$v = 1{,}8665 \cdot 5{,}56 = 10{,}38 \text{ м/с}.$$

Объемный расход ОГ легкового АТС в транспортном потоке до оптимизации движения:

$$Q_{\text{ог}} = 0{,}0007 \cdot 5{,}19^2 - 0{,}0256 \cdot 5{,}19 + 0{,}3184 = 0{,}204 \text{ м}^3\text{/с};$$

после оптимизации:

$$Q_{\text{ог}} = 0{,}0007 \cdot 10{,}38^2 - 0{,}0256 \cdot 10{,}38 + 0{,}3184 = 0{,}128 \text{ м}^3\text{/с}.$$

Концентрацию СО в ОГ легкового автомобиля можно представить в виде аналитической зависимости:

$$c_i = f(\bar{\alpha}),\ c_i = f(\bar{N}),$$

где $\bar{\alpha}$ — относительный коэффициент избытка воздуха; $\bar{N}$ — относительная мощность двигателя (табл. 1).

Таблица 1

Аналитические зависимости концентрации СО в ОГ от $\bar{\alpha}$

Вид двигателя	Диапазон изменения $\bar{\alpha}$	Концентрация, c_i, г/м^3
Бензиновый с принудительным зажиганием	0–1,0	$-237{,}71\bar{\alpha}^3 + 540{,}29\bar{\alpha}^2 - 385{,}24\bar{\alpha} + 92{,}937$
С воспламенением от сжатия	0–1,0	$5{,}6754\bar{N}^4 - 11{,}758\bar{N}^3 + 9{,}9078\bar{N}^2 - 3{,}5046\bar{N} + 0{,}7996$

Относительный коэффициент избытка воздуха для легковых автомобилей с бензиновыми (карбюраторными) двигателями рассчитывают по формуле:

$$\bar{\alpha} = 0{,}8775\bar{N}^3 - 2{,}1263\bar{N}^2 + 2{,}0224\bar{N} + 0{,}2387.$$

Относительную мощность двигателя определим из уравнения:

$$\bar{N}N_{\text{ном}} = \frac{\left[k_{\text{ф}}\rho_{\text{в}}F_s v_j^2 + mg\cos\gamma\left(f \pm \text{tg}\gamma\right) \pm \delta_{\text{вр}}am\right]v_j}{\eta_{\text{тр}}}.$$

Здесь $\bar{N}N_{\text{ном}}$ — произведение, представляющее собой эффективную мощность двигателя; $N_{\text{ном}}$ — номинальная мощность двигателя, Вт (для легковых бензиновых АТС принимаем $N_{\text{ном}}$ = 60 000 Вт; для дизельных — $N_{\text{ном}}$ = 70 000 Вт); $k_{\text{ф}}$ — коэффициент обтекаемости (для легковых АТС $k_{\text{ф}}$ = 0,15); $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха, $\rho_{\text{в}}$ = 1,293 кг/м^3; F_s — площадь лобовой поверхности автомобиля, м^2 (для легковых АТС F_s = 1,5 м^2); m — масса автомобиля, кг (для легковых АТС принимаем m = 1750 кг); g — ускорение свободного падения, м/с^2; f — коэффициент сопротивления качению, f = 0,02; $\delta_{\text{вр}}$ — коэффициент учета вращающихся масс; a — ускорение автомобиля, м/с; $\eta_{\text{тр}}$ — механический КПД трансмиссии.

Знак минус перед tgγ ставят при движении под уклон. Для оценочного расчета принимаем γ = 0.

Произведение $\delta_{вр}$a для легковых АТС можно представить выражением:

$$\pm\delta_{\text{вр}}a = g\left(2{,}023v^{-1{,}0678} - \Psi\right).$$

Здесь Ψ — коэффициент приведенного сопротивления дороги. Численно можно принять $\Psi = (f \pm \text{tg}\gamma)\cos\gamma$.

До оптимизации:

$$\delta_{\text{вр}}a = 9{,}87\cdot\left(2{,}023\cdot 5{,}19^{-1{,}0678} - 0{,}02\right) = 3{,}243;$$

после оптимизации:

$$\delta_{\text{вр}}a = 9{,}87\cdot\left(2{,}023\cdot 10{,}38^{-1{,}0678} - 0{,}02\right) = 1{,}444.$$

Рассчитаем механический КПД:

— для бензиновых двигателей с принудительным зажиганием

$$\eta_{\text{тр}} = -2{,}9224\bar{N}^3 + 3{,}4211\bar{N}^2 - 1{,}0995\bar{N} + 1{,}0299;$$

— для двигателей с воспламенением от сжатия

$$\eta_{\text{тр}} = -1{,}3238\bar{N}^3 + 1{,}118\bar{N}^2 - 0{,}031\bar{N} + 0{,}8755.$$

Итак, подставив все известные величины в уравнение, получим $\bar{N}$ легкового бензинового (карбюраторного) автомобиля до оптимизации:

$$\bar{N} = \frac{\left[0{,}15\cdot 1{,}293\cdot 1{,}5\cdot 5{,}19^2 + 1750\cdot 9{,}87\cdot 1\cdot 0{,}02 + 3{,}243\cdot 1750\right]\cdot 5{,}19}{60000(-2{,}9224\bar{N}^3 + 3{,}4211\bar{N}^2 - 1{,}0995\bar{N} + 1{,}0299)},$$

$$\bar{N} = \frac{0{,}5215}{-2{,}9224\bar{N}^3 + 3{,}4211\bar{N}^2 - 1{,}0995\bar{N} + 1{,}0299}.$$

Отсюда:

$$-2{,}9224\bar{N}^4 + 3{,}4211\bar{N}^3 - 1{,}0995\bar{N}^2 + 1{,}0299\bar{N} - 0{,}5215 = 0.$$

Это уравнение имеет два действительных корня ($\bar{N}_1 = 0{,}959$ и $\bar{N}_2 = 0{,}536$), один из которых ($\bar{N}_1$) приблизительно равен единице. Учитывая физический смысл задачи, принимаем, что на заданных скоростях достижение такой относительной мощности вряд ли возможно и наиболее вероятным решением является второй действительный корень ($\bar{N}_2$) [9]. Таким образом,

$$\bar{N} = \bar{N}_2 = 0{,}536.$$

После оптимизации:

$$\bar{N} = \frac{\left[0{,}15\cdot 1{,}293\cdot 1{,}5\cdot 10{,}38^2 + 1750\cdot 9{,}87\cdot 1\cdot 0{,}02 + 1{,}444\cdot 1750\right]\cdot 10{,}38}{60000(-2{,}9224\bar{N}^3 + 3{,}4211\bar{N}^2 - 1{,}0995\bar{N} + 1{,}0299)},$$

$$\bar{N} = \frac{0{,}5024}{-2{,}9224\bar{N}^3 + 3{,}4211\bar{N}^2 - 1{,}0995\bar{N} + 1{,}0299}.$$

Отсюда:

$$-2{,}9224\bar{N}^4 + 3{,}4211\bar{N}^3 - 1{,}0995\bar{N}^2 + 1{,}0299\bar{N} - 0{,}5024 = 0.$$

Уравнение имеет два действительных корня ($\bar{N}_1 = 0{,}969$ и $\bar{N}_2 = 0{,}517$), один из которых ($\bar{N}_1$) приблизительно равен единице. Учитывая физический смысл задачи, принимаем $\bar{N} = \bar{N}_2 = 0{,}517$.

$\bar{N}$ легкового дизельного автомобиля до оптимизации:

$$\bar{N} = \frac{\left[0{,}15\cdot 1{,}293\cdot 1{,}5\cdot 5{,}19^2 + 1750\cdot 9{,}87\cdot 1\cdot 0{,}02 + 3{,}243\cdot 1750\right]\cdot 5{,}19}{70000(-1{,}3238\bar{N}^3 + 1{,}118\bar{N}^2 - 0{,}031\bar{N} + 0{,}8755)},$$

$$\bar{N} = \frac{0,447}{-1,3238\bar{N}^3 + 1,118\bar{N}^2 - 0,031\bar{N} + 0,8755}.$$

Отсюда:

$$-1,3238\bar{N}^4 + 1,118\bar{N}^3 - 0,031\bar{N}^2 + 0,8755\bar{N} - 0,447 = 0.$$

Уравнение имеет два действительных корня ($\bar{N}_1 = 1{,}11$ и $\bar{N}_2 = 0{,}461$), один из которых ($\bar{N}_1$) приблизительно равен единице. Учитывая физический смысл задачи, принимаем $\bar{N} = \bar{N}_2 = 0{,}461$.

После оптимизации:

$$\bar{N} = \frac{\left[0,15 \cdot 1,293 \cdot 1,5 \cdot 10,38^2 + 1750 \cdot 9,87 \cdot 1 \cdot 0,02 + 1,444 \cdot 1750\right] \cdot 10,38}{70000(-1,3238\bar{N}^3 + 1,118\bar{N}^2 - 0,031\bar{N} + 0,8755)},$$

$$\bar{N} = \frac{0,4306}{-1,3238\bar{N}^3 + 1,118\bar{N}^2 - 0,031\bar{N} + 0,8755}.$$

Отсюда:

$$-1,3238\bar{N}^4 + 1,118\bar{N}^3 - 0,031\bar{N}^2 + 0,8755\bar{N} - 0,4306 = 0.$$

Уравнение имеет два действительных корня ($\bar{N}_1 = 1{,}12$ и $\bar{N}_2 = 0{,}446$), один из которых ($\bar{N}_1$) приблизительно равен единице. Учитывая физический смысл задачи, принимаем $\bar{N} = \bar{N}_2 = 0{,}446$.

Рассчитаем коэффициент избытка воздуха для легковых АТС с бензиновым двигателем.

До оптимизации:

$$\bar{\alpha} = 0,8775 \cdot 0,536^3 - 2,1263 \cdot 0,536^2 + 2,0224 \cdot 0,536 + 0,2387 = 0,847.$$

После оптимизации:

$$\bar{\alpha} = 0,8775 \cdot 0,517^3 - 2,1263 \cdot 0,517^2 + 2,0224 \cdot 0,517 + 0,2387 = 0,837.$$

Определим концентрацию СО в ОГ легковых АТС по формулам из табл. 1.

Легковые бензиновые (карбюраторные) АТС до оптимизации:

$$c = -237,71 \cdot 0,847^3 + 540,29 \cdot 0,847^2 - 385,24 \cdot 0,847 + 92,937 = 9,804 \text{ г/м}^3;$$

после оптимизации:

$$c = -237,71 \cdot 0,837^3 + 540,29 \cdot 0,837^2 - 385,24 \cdot 0,837 + 92,937 = 9,614 \text{ г/м}^3.$$

Легковые дизельные АТС до оптимизации:

$$c = 5,6754 \cdot 0,461^4 - 11,758 \cdot 0,461^3 + 9,9078 \cdot 0,461^2 - 3,5046 \cdot 0,461 + 0,7996 = 0,394 \text{ г/м}^3;$$

после оптимизации:

$$c = 5,6754 \cdot 0,446^4 - 11,758 \cdot 0,446^3 + 9,9078 \cdot 0,446^2 - 3,5046 \cdot 0,446 + 0,7996 = 0,389 \text{ г/м}^3.$$

Основываясь на полученных данных, находим массовый расход СО единичным легковым автомобилем.

Бензиновый карбюраторный автомобиль до оптимизации:

$$M = 9,804 \cdot 0,204 = 2,00002 \text{ г/с};$$

после оптимизации:

$$M = 9,614 \cdot 0,128 = 1,2306 \text{ г/с}.$$

Дизельное АТС до оптимизации:

$$M = 0,394 \cdot 0,204 = 0,0804 \text{ г/с};$$

после оптимизации:

$$M = 0,389 \cdot 0,128 = 0,0498 \text{ г/с}.$$

Массовый расход СО легковыми автомобилями в транспортном потоке на участке дорожной сети определяем по формуле:

$$\sum M_{ijk} = M_{ijk} \lambda_{jk} K,$$

где λ_{jk} — доля автомобилей по назначению и виду топлива в транспортном потоке (для бензиновых легковых АТС λ_{jk} = 0,36, для дизельных — λ_{jk} = 0,014); K — объем движения (число АТС, находящихся на участке дорожной транспортной сети в данный момент), шт.

Объем движения рассчитывается по формуле:

$$K = \left[\frac{L - d_{\text{ср}}}{h} + 1\right] z,$$

где $d_{\text{ср}}$ — средняя длина транспортного средства, м (принимаем для транспортного потока 5,5 м); h — средний пространственный интервал между автомобилями, м; z — число полос движения (принимаем z = 4).

Средний пространственный интервал между автомобилями:

$$h = 0{,}0285 v_{\text{т.п.}}{}^2 + 0{,}504 v_{\text{т.п.}} + 5{,}7.$$

Рассчитаем средний пространственный интервал и объем движения (с учетом увеличения длины исследуемого участка).

До оптимизации:

$$h = 0{,}0285 \cdot 2{,}78^2 + 0{,}504 \cdot 2{,}78 + 5{,}7 = 7{,}32 \text{ м};$$

$$K = \left[\frac{200 - 5{,}5}{7{,}32} + 1\right] \cdot 4 = 110{,}3 \text{ шт.};$$

после оптимизации:

$$h = 0{,}0285 \cdot 5{,}56^2 + 0{,}504 \cdot 5{,}56 + 5{,}7 = 9{,}38 \text{ м};$$

$$K = \left[\frac{360 - 5{,}5}{9{,}38} + 1\right] \cdot 4 = 155{,}2 \text{ шт.}$$

Тогда массовый расход выбросов СО легковыми автомобилями на исследуемом участке дорожной сети до оптимизации составляет:

$$M = 110{,}3 \cdot \left(2{,}00002 \cdot 0{,}36 + 0{,}0804 \cdot 0{,}014\right) = 79{,}5412 \text{ г/с};$$

после оптимизации:

$$M = 155{,}2 \cdot \left(1{,}2306 \cdot 0{,}36 + 0{,}0498 \cdot 0{,}014\right) = 68{,}8642 \text{ г/с}.$$

В результате проведенного оптимизационного мероприятия изменилось время движения легковых АТС по участку.

До оптимизации:

$$t = \frac{200}{5{,}19} = 38{,}54 \text{ с};$$

после оптимизации:

$$t = \frac{360}{10{,}38} = 34{,}68 \text{ с}.$$

Таким образом, суммарный выброс СО легковыми автомобилями за время движения по участку составил до оптимизации:

$$M = 79{,}5412 \cdot 38{,}54 = 3065{,}518 \text{ г} = 3{,}066 \text{ кг};$$

после оптимизации:

$$M = 68{,}8642 \cdot 34{,}68 = 2388{,}21 \text{ г} = 2{,}388 \text{ кг}.$$

Заключение. Итак, проведение мероприятий по оптимизации дорожного движения позволит снизить выбросы СО легковыми автомобилями примерно на 22 %, что приведет к значительному улучшению качества атмосферного воздуха на исследуемом участке [10].

Библиографический список

1. Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах / Минтранс России. — Москва : Росавтодор, 2002. — 220 с.

2. Петров, В. И. Технические средства организации дорожного движения (светофоры, дорожные контроллеры, АСУДД) / В. И. Петров, И. Е. Агуреев, Н. В. Григорьева. — Тула : Изд-во ТулГУ, 2010. — 269 с.

3. Организация дорожного движения в городах / Министерство транспорта РФ. — Москва : Транспорт, 2005. — 93 с.

4. ГОСТ Р 52289-2004. Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств / РОСДОРНИИ ; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2006. — 98 с.

5. Ставничий, Ю. А. Дорожно-транспортная сеть и безопасность движения / Ю. А. Ставничий. — Москва : Транспорт, 2004. — 72 с.

6. Пугачев, И. Н. Организация и безопасность движения / И. Н. Пугачев. — Хабаровск : Изд-во гос. техн. ун-та, 2004. — 232 с.

7. Луканин, В. Н. Промышленная транспортная экология / В. Н. Луканин, Е. В. Трофименко. — Москва : Высшая школа, 2001.— 273 с.

8. Калыгин, В. Г. Промышленная экология / В. Г. Калыгин. — Москва : Академия, 2015. — 64 с.

9. Аксенов, И. Я. Транспорт и охрана окружающей среды / И. Я. Аксенов, В. И. Аксенов. — Москва : Транспорт, 2006. — 176 с.

10. Саркисов, О. Р. Экологическая безопасность и эколого-правовые проблемы в области загрязнения окружающей среды / О. Р. Саркисов, Е. Л. Любарский, С. Я. Каз. — Москва : Юнити, 2013. — 231 с.

Об авторах:

Дуров Роман Сергеевич,
магистрант Донского государственного технического университета
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
roma.0107@mail.ru

Варнакова Екатерина Владимировна,
магистрант Донского государственного технического университета
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
katya-arena97@mail.ru

Кобзев Кирилл Олегович,
доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), кандидат технических наук,
5976765@mail.ru

Кобзева Наталия Дмитриевна,
ассистент кафедра внутренних болезней № Ростовского государственного медицинского университета (РостГМУ), кандидат медицинских наук,
5976765@mail.ru